

دراسة التوزع الزاوي للخطوط الطيفية الناتجة عن التفكك الإشعاعي للنظيرين المشعنين الكوبالت $^{60}_{27}Co$ والصوديوم $^{22}_{11}Na$

د. جبور نوفل جبور *

د. هيثم ابراهيم جبيلي **

سارة ابراهيم الجمال ***

(تاريخ الإيداع 2021 /7/11 – تاريخ النشر 2021 /9 /5)

□ ملخص □

تم دراسة تفكك (β^-) لنظير الكوبالت $^{60}_{27}Co$ مع قدرة فصل تقدر بـ (5.6%~) ودراسة تفكك (β^+) لنظير الصوديوم $^{22}_{11}Na$ مع قدرة فصل تقدر بـ (5.6%~) باستعمال كاشف من يوديد الصوديوم (NaI) المشاب بالتاليوم (Tl).

دُرست التوزعات الزاوية للانتقالين $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$ و $2_1^+ \rightarrow 0_{gs}^+$ بطاقتين (1173keV) و (1332keV) على التوالي لنواة النيكل $^{60}_{28}Ni$ كما دُرست التوزعات الزاوية للخطين الطيفيين الناتجين عن تفكك الصوديوم $^{22}_{11}Na$ والمتوضعين عند الطاقتين 511 keV و 1274 keV من أجل زوايا تتراوح قيمها بين 0° و 90° . تم أيضاً تحليل المعطيات بالاعتماد على نموذج الطبقات.

كلمات مفتاحية: أشعة غاما، كاشف يوديد الصوديوم (NaI)، منبع مُشع، طيف طاقي، سويات محرّضة، نموذج الطبقات، توزع زاوي.

*أستاذ في قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

**أستاذ في قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

***طالبة دراسات عليا (دكتوراه) - اختصاص فيزياء إشعاعية - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Study of the angular distributions for the energies peaks by decay of the radioactive isotopes Cobalt ${}^{60}_{27}\text{Co}$ and Sodium ${}^{22}_{11}\text{Na}$.

Dr. Jabbour Noufal Jabbour*

Dr. Haisam Ibrahim Jbeli**

Sara Ibrahim Aljammal***

(Received 11/7/2021. Accepted 5/9/2021)

□ ABSTRACT □

The decay (β^-) of ${}^{60}_{27}\text{Co}$ isotope has been studied with an overall energy resolution ($\sim 5.6\%$) and the decay (β^+) of ${}^{22}_{11}\text{Na}$ isotope has been studied with an overall energy resolution ($\sim 5.6\%$) using a detector calibration NaI(Tl) .

Angular distributions have been obtained for the tow transitions $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$ and $2_1^+ \rightarrow 0_{g.s}^+$ states of ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ (1173keV , 1332keV) and angular distributions have been obtained for the tow energies peak at 511 keV and 1274 keV results by decay of the radioactive isotopes sodium. The data have been analyzed with the Shell Model.

Words keys: Gamma rays, sodium iodide (NaI) detector, source radioactive, energy spectrum, excited states, shell model, angular distribution.

*Professor, Physics Department, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**Professor, Physics Department, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria.

***Postgraduate Student, Radiation Physics, Department of Physics, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria

١ - مقدمة:

هناك العديد من الطرائق التي تسمح بمراقبة الحالات المُحرّضة للنوى. على سبيل المثال، نستخدم كثيراً المنابع المُشعة الصناعية حيث ينتج عن التفكك نوى وليدة ذات سويات مُحرّضة. وفي أغلب الأحيان، فإن النواة الوليدة تفقد طاقتها المُحرّضة بشكل سريع عن طريق إصدار إشعاعات غاما γ متتالية، ويسمح كشف هذه الإشعاعات بالحصول على الطاقات الخاصة للنواة الوليدة.

يمكن أيضاً استنتاج المميزات والصفات الكوانتية لهذه السويات المُحرّضة المكشوفة، مثل السبين النووي والنوعية. وبالتالي يمكن الحصول على مخطط السويات المُحرّضة للنواة الناتجة عن التفكك. ويمكن أيضاً دراسة السويات المُحرّضة بوساطة التفاعلات النووية.

تجريبياً، إن النوى التي تمتلك أعداداً من الجسيمات (النيوكليونات) مثل [١-٩]:

$$Z, N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, \dots$$

هذه الأعداد النيوترونات (N) والبروتونات (Z) تُدعى «بالأعداد السحرية»، ومثل هذه النوى عُرفت بالنوى الأكثر ارتباطاً؛ ويظهر لهذه الأعداد من النيوكليونات دور هام يساهم في استقرار هذه النوى.

تُدعى النوى التي تحتوي على «أعداد سحرية» من البروتونات أو النيوترونات «بالنوى السحرية»، وتُدعى النوى التي تملك بأن واحد «أعداد سحرية» من البروتونات والنيوترونات «بالنوى السحرية المضاعفة».

إن وجود هذه الأعداد أدى إلى استخدام «نموذج الطبقات» المستوحى من النموذج الذري والمشابه له.

يتألف هذا العمل من دراسة طيفية لنواتي النيكل $^{60}_{28}\text{Ni}$ والنيون $^{22}_{11}\text{Na}$ ودراسة تحليلية للسويات المُحرّضة لهاتين النواتين بوساطة تفكك (β^-) للنظير المشع الكوبالت $^{60}_{27}\text{Co}$ ، وتفكك (β^+) للنظير المشع الصوديوم $^{22}_{11}\text{Na}$.

٢ - أهمية البحث وأهدافه:

إن الهدف الرئيس لهذا البحث هو الدراسة الطيفية التجريبية للطيف الطاقي للنظيرين المشعين الكوبالت $^{60}_{27}\text{Co}$ والصوديوم $^{22}_{11}\text{Na}$ ، دراسة التوزع الزاوي للسويات المُحرّضة.

٣ - طريقة البحث ومواده:

إن الأجهزة والأدوات المستخدمة في هذا البحث هي:

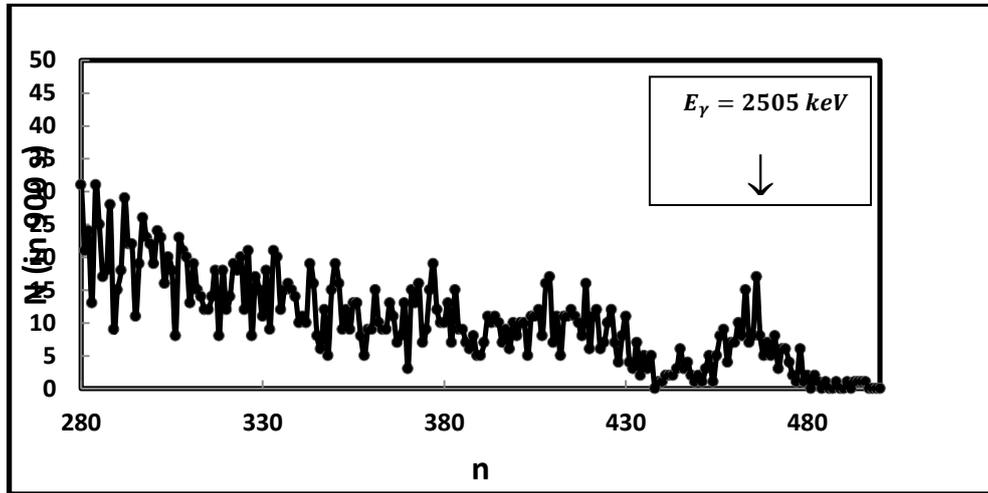
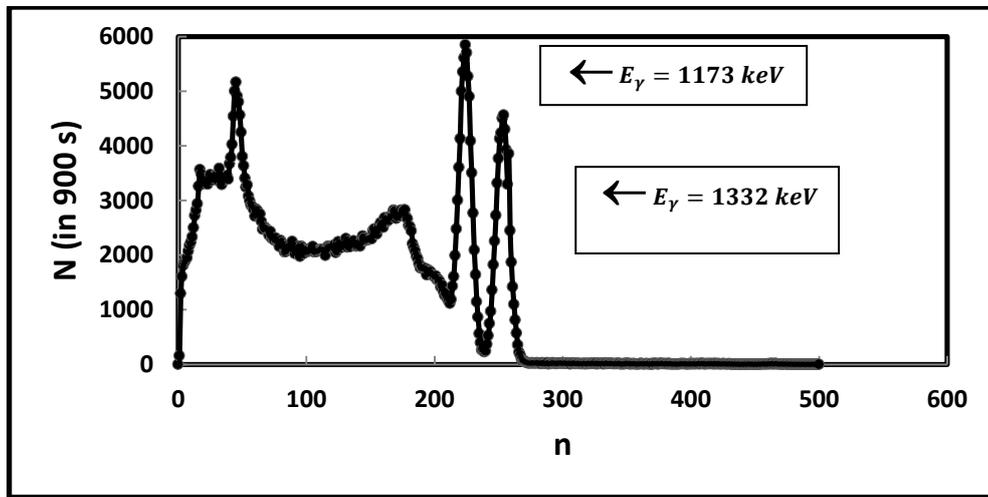
- ١- المنابع المشعة الكوبالت $^{60}_{27}\text{Co}$ والصوديوم $^{22}_{11}\text{Na}$.
- ٢- كاشف وميضي.
- ٣- محلل متعدد الأقنية.
- ٤- حاسوب مُجهز ببرنامج (يُدعى CASSY) لمعالجة القياسات.

ملاحظة: جميع هذه الأجهزة [١٠] موجودة في مخبر الفيزياء النووية (قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة تشرين)، حيث تم إنجاز هذا البحث. ونشير هنا إلى أن آلية عمل الأجهزة المستخدمة، ومعايرة الكاشف سُرحت سابقاً في المرجع [١١]، ويمكن الرجوع أيضاً إلى المراجع التالية [١٢-١٤].

٤ - النتائج والمناقشة:

٤-١ - النتائج التجريبية لنظير المشع الكوبالت ^{60}Co :

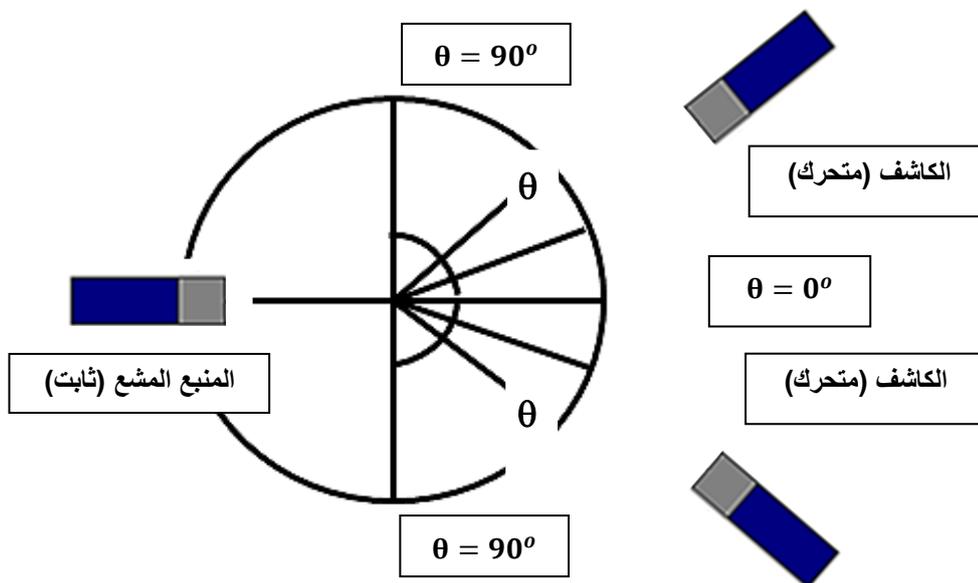
يمثل الشكل (١) الطيف الطاقي لنظير الكوبالت ^{60}Co . معدل العدّ N بتابعية رقم القناة n . $E_\gamma = (1173\text{keV}, 1332\text{keV}, 2505\text{keV})$ ، بُعد المنبع عن الكاشف (5cm).



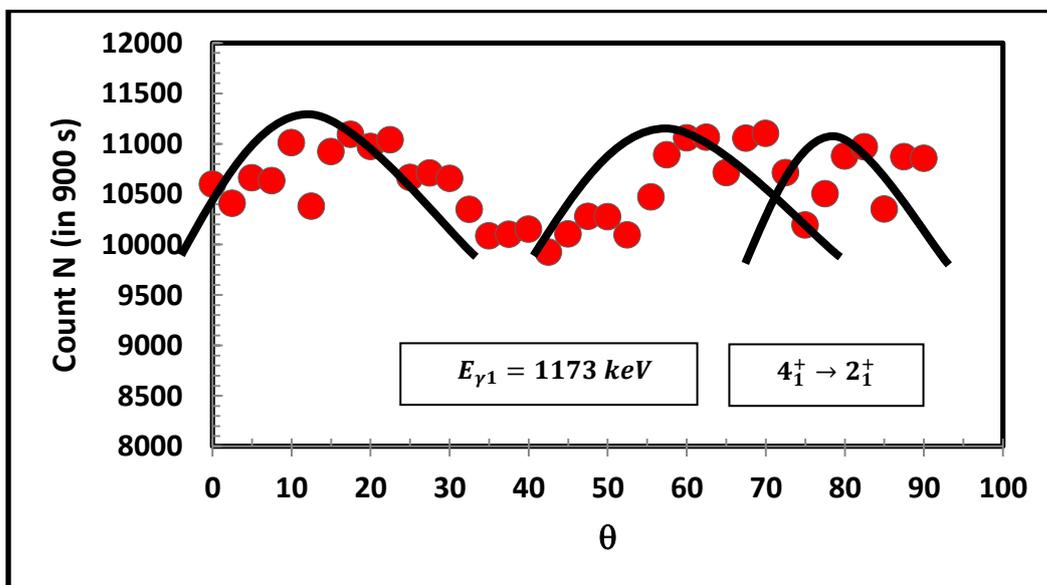
الشكل (١): يمثل الطيف الطاقي لأشعة غاما لنظير الكوبالت ^{60}Co الممتص في الكاشف NaI(Tl) . معدل العدّ N بتابعية رقم القناة n . (منبعمعياري)،

$E_\gamma = (1173\text{ keV}, 1332\text{ keV}, 2505\text{ keV})$ ، بُعد المنبع عن الكاشف (5cm)، تم تسجيل العد خلال ٩٠٠ ثانية.

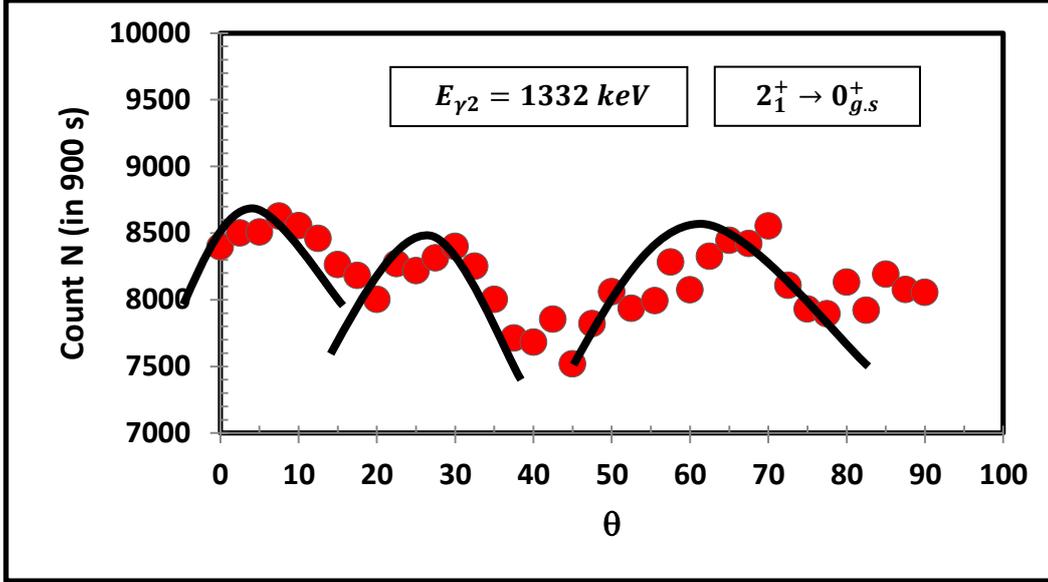
تم قياس التوزيع الزاوي لكل من الانتقالين $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$ و $2_1^+ \rightarrow 0_{g.s}^+$ بطاقتين (1173keV) و (1332keV) على التوالي لنواة النيكل $^{60}_{28}\text{Ni}$ من أجل زوايا تتراوح قيمها بين 0° و 90° ، الشكل (٢). إن الشكلين (٣) و (٤) يُمثلان التوزيعات الزاوية للانتقالين السابقين.



الشكل (٢): يوضح وضع الكاشف (المتحرك) بالنسبة للمشع (الثابت). يمكن تحريك الكاشف يمينا ويساراً، أي أنه يمكننا وضع الكاشف بالزاوية التي نريدها.



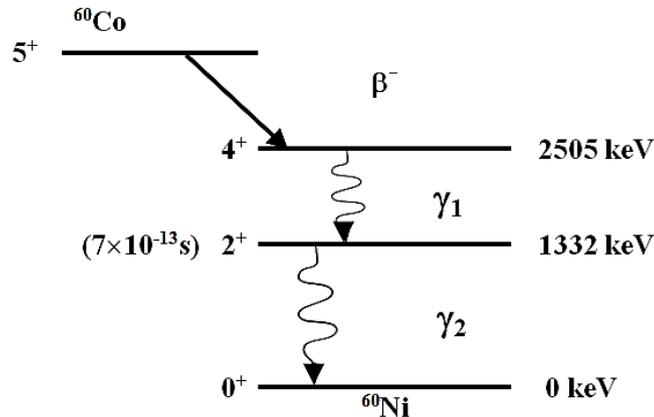
الشكل (٣): يمثل تغير العدد N بتابعية زاوية الكشف θ . وهذا ما نُطلق عليه اسم التوزيع الزاوي للخط الطيفي 1173 keV. وهذا يمثل الانتقال $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$ إن المنحنيات رسمت فقط من أجل توجيه العين.



الشكل (٤): يمثل تغير العد N بتابعية زاوية الكشف θ . وهذا ما نُطلق عليه اسم التوزيع الزاوي للسوية 2^+ التي طاقتها 1332 keV . وهذا يمثل الانتقال $2_1^+ \rightarrow 0_{g.s}^+$. إن المنحنيات رُسمت فقط من أجل توجيه العين.

نستنتج من التوزيعات الزاوية السابقة أن كل انتقال له مميزات وصفات مختلفة عن الآخر. إن القيمة العظمى الأولى للانتقال $4_1^+ \rightarrow 2_1^+$ تتواجد عند الزاوية $\theta = 15^\circ$ ، بينما العظمى الأولى للانتقال $2_1^+ \rightarrow 0_{g.s}^+$ تتواجد عند الزاوية $\theta = 10^\circ$. وعادة في هذا المجال، أو في هذا النوع من الدراسات، فإنه كلما زادت قيمة السبين النووي J^π ، بعبارة أخرى، كلما ازدادت قيمة l ، فإن القيمة العظمى الأولى للتوزيع الزاوي ينزاح نحو اليسار، أي باتجاه القيم المتزايدة للزاوية [15]، وهذه النتائج تتوافق مع النتائج المتعارف عليها في هذا النوع من الدراسات.

يمثل الشكل (٥) مخطط التفكك لنظير الكوبالت ^{60}Co المشع.



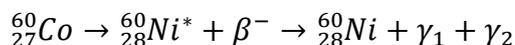
الشكل (٥): مخطط التفكك لنظير الكوبالت ^{60}Co المشع. $E_{\gamma 1} = 1173 \text{ keV}$ و $E_{\gamma 2} = 1332 \text{ keV}$.

إذا أخذنا الطيف الطاقي للكوبالت-٦٠ (^{60}Co) نلاحظ أن هناك خط طيفي صغير تموضع عند الطاقة (2505keV). إن مصدر هذا الخط الطيفي هو أن الاحتمال غير المعدوم للحصول على مفعولين كهروضوئيين، يرافقان فوتونين γ بطاقتين: (1173keV) و (1332keV) ينبعثان من النيكل-٦٠ (^{60}Ni) الذي يتخلى عن طاقته، بالوقت نفسه، ويعود إلى حالته الأساسية. يُرسل عند ذلك المهبط الضوئي إلكترونيين بالوقت نفسه، يُضخمان بالوقت ذاته، ونرى ظهور خط طيفي طاقته تساوي مجموع الطاقتين:

$$\begin{aligned} {}^{60}_{27}\text{Co} &\rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni}^* + \beta^- \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + \gamma_1 + \gamma_2 \\ E_{\gamma_1} &= 1172 \text{ keV} \quad \& \quad E_{\gamma_2} = 1332 \text{ keV} \\ E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2} &= 1172 + 1332 = 2505 \text{ keV} \end{aligned}$$

إن تفكك نظير الكوبالت-٦٠ يتم بواسطة تفكك β^- (أي تحول نترين إلى بروتون)، في معظم الأحيان (أكثر من 99%)، إلى السوية المحرصة (2505keV) للنيكل ^{60}Ni . ويتفكك لاحقاً إلى الحالة الأساسية مُصدراً فوتون غاما طاقته (1173keV) متبوعاً، تقريباً بأن واحد، بفوتون غاما آخر طاقته (1332keV) نحو الحالة الأساسية (إن حياة السوية 1332keV تُقدر بـ $7 \times 10^{-13}\text{s}$ ، بحيث أن الفوتونين غاما يظهران وكأنهما متزامنان من الناحية التجريبية) [١٦].

تُعطى معادلة التفكك لنظير الكوبالت-٦٠ على النحو الآتي:



تُحسب الطاقة الناتجة عن التفكك (أو الطاقة الكلية) على النحو الآتي:

$$\begin{aligned} {}^{60}_{27}\text{Co} &\rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu} \\ Q_{\beta^-} &= (M_{\text{Co}} - M_{\text{Ni}})c^2 = (59.933813u - 59.930787u) \left(\frac{931.5 \text{ MeV}}{u} \right) = 2,818719 \text{ MeV} \\ &\cong 2,819 \text{ MeV} \cong 2819 \text{ keV} \end{aligned}$$

وبمقارنتها مع القيمة:

$$E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2} = 1172 + 1332 = 2505 \text{ keV}$$

نلاحظ أن الفارق بينهما يساوي تقريباً ($2819 - 2505 = 314 \text{ keV}$)، وهذا الفرق هو نتيجة ضياع في الطاقة عند الخروج من المنبع ومن ثم عند الدخول في الكاشف. وهكذا نحصل على نفس القيم الموضحة على الشكل (٥).

بالعودة إلى نواة النيكل ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ الناتجة عن تفكك النظير المشع للكوبالت ${}^{60}_{27}\text{Co}$ نلاحظ أن هذه النواة هي زوجية البروتونات والنيوترونات. واستناداً إلى نموذج الطبقات، فإن توزع البروتونات والنيوترونات على الطبقات النووية موضح في الشكل (٦).

| | | | | |
|------------|----------|-----------|----------|-----------|
| $1f_{5/2}$ | | ●○○○○○ | | |
| $2p_{3/2}$ | | ●●●● | | ●●●● |
| | ٢٨ | ٢٨ | ٢٨ | ٢٨ |
| $1f_{7/2}$ | ●●●●●●●○ | ●●●●●●●● | ●●●●●●●● | ●●●●●●●● |
| | 20 | 20 | 20 | 20 |
| $1d_{3/2}$ | ●●●● | ●●●● | ●●●● | ●●●● |
| $2s_{1/2}$ | ●● | ●● | ●● | ●● |
| $1d_{5/2}$ | ●●●●●●● | ●●●●●●● | ●●●●●●● | ●●●●●●● |
| | 8 | 8 | 8 | 8 |
| $1p_{1/2}$ | ●● | ●● | ●● | ●● |
| $1p_{3/2}$ | ●●●● | ●●●● | ●●●● | ●●●● |
| | ٢ | ٢ | ٢ | ٢ |
| $1s_{1/2}$ | ●● | ●● | ●● | ●● |
| | بروتونات | نيوترونات | بروتونات | نيوترونات |



الشكل (٦): توزع البروتونات والنيوترونات على الطبقات النووية لكل من ${}^{60}_{27}\text{Co}_{33}$ و ${}^{60}_{28}\text{Ni}_{32}$ وفق نموذج الطبقات.

| | |
|-------------|--------------|
| ○ مكان فارغ | ● مكان مملوء |
|-------------|--------------|

استناداً إلى ذلك، وإلى توزيع البروتونات والنيوترونات على الطبقات وفق نموذج الطبقات، فإن سبين ونوعية الحالة الأساسية (المستقرة غير المحرصة) للنوى المدروسة هي [١١]:

من أجل ${}^{60}_{28}\text{Ni}_{32}$ (زوجية - زوجية):

$(J^\pi) = 0^+$ وذلك لأنهما نوى زوجية البروتونات والنيوترونات

من أجل ${}^{60}_{27}\text{Co}_{33}$ (فردية - فردية):

$$\pi = (-1)^{\ell_n + \ell_p} = (-1)^{f+f} = (-1)^{3+3} = +$$

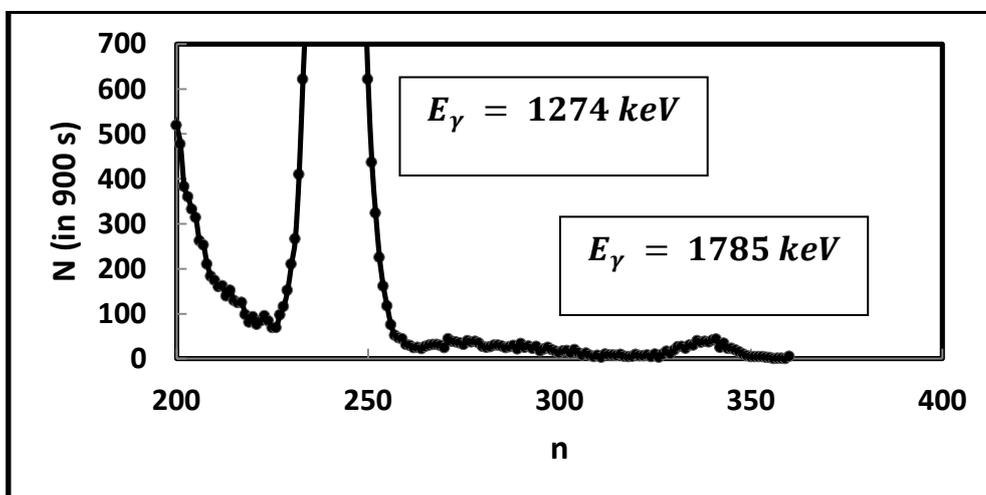
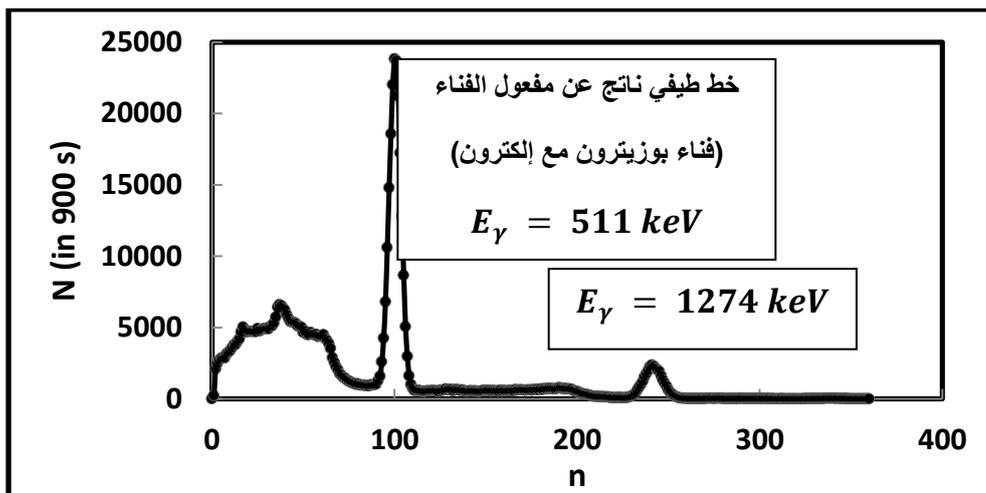
$$\rightarrow (J^\pi) = 0^+, 1^+, 2^+, 3^+, 4^+, 5^+, 6^+$$

ووجد تجريبياً أن $(J^\pi) = 5^+$ وهي قيمة تقع بين القيم المتوقعة نظرياً.

٤-٢- النتائج التجريبية للنظير المشع الصوديوم ${}^{22}_{11}\text{Na}$:

يمثل الشكل (٧) الطيف الطاقي لنظير الكوبالت ${}^{22}_{11}\text{Na}$ معدّل العدّ N بتابعية رقم القناة n .

$E_\gamma = 511 \text{ keV}, 1274 \text{ keV}, 1785 \text{ keV}$ ، بُعد المنبع عن الكاشف (5cm).

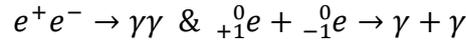


الشكل (٧): يمثل الطيف الطاقي لأشعة غاما، لنظير الصوديوم $^{22}_{11}\text{Na}$ ، الممتص في الكاشف NaI(Tl) . معدّل العدّ N بتابعية رقم القناة n . (منبع معياري)، $E_\gamma = 511 \text{ keV}, 1274 \text{ keV}, 1785 \text{ keV}$ ، بعد المنبع عن الكاشف (5cm). بسبب فناء البوزيترون في الكاشف والمنبع بعد ذاته، هناك خط طيفي وحيد بطاقة 511 keV يتم ملاحظته أو كشفه، وهو يوافق كشف فوتون وحيد فقط للفوتونين الناتجين عن مفعول الفناء.

إذا أخذنا الطيف الطاقي للصوديوم $^{22}_{11}\text{Na}$ نلاحظ أن هناك ثلاثة خطوط طيفية تتموضع عند الطاقات التالية: $E_\gamma = 511 \text{ keV}, 1274 \text{ keV}, 1785 \text{ keV}$.

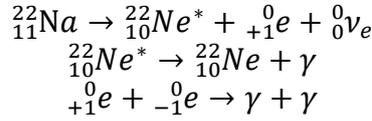
إن الصوديوم ٢٢ هو نظير مُشع يُصنع بدور يُقدر تقريباً بـ (2,5 years)، أي 2,5 سنة. يتفكك بإصدار بوزيترون (تفكك β^+) ويُعطي النيون ٢٢ المستقر. وهناك جزء صغير جداً (0,06%) من التفككات يصل مباشرة للحالة الأساسية للنيون. إن المتبقي يقود إلى حالة مُحرّضة للنيون، وجزء منه إلى الأسر الإلكتروني (يُقدر تقريباً بـ 10%) من الإلكترونات الذرية الداخلية، وقسم كبير بإصدار البوزيترونات. إن الحالة المُحرّضة للنيون تتخلى عن طاقتها لاحقاً، حيث تعود نواة النيون لحالتها الأساسية (*groud state g.s*) بإصدار فوتون غاما طاقته (1274 keV). ويُقدر عمر النيون المُحرّض فقط بـ ($3,7 \text{ ps} = 3,7 \times 10^{-12} \text{ s}$)، أي 3,7 بيكو ثانية.

إن تفاعل البوزيترونات الصادرة مع إلكترونات المادة المحيطة يقود إلى توليد إشعاع الفناء (annihilation radiation) المميز بطاقة قدرها (511 keV) . وبسبب انحفاظ كمية الحركة، فهناك فوتونين غاما (γ) يُصدران في اتجاهين متعاكسين نتيجة الفناء لبوزيترون وإلكترون. وبسبب التزامن الضعيف بين الخط الطيفي (1274 keV) وإشعاع الفناء، هناك خط طيفي يظهر في الطيف الطاقوي عند القيمة $(511 \text{ keV} + 1274 \text{ keV} = 1785 \text{ keV})$ ، وهذا ناتج عن الامتصاص المتزامن (بأن واحد) للفوتونين (γ). بعبارة أخرى فإن تفكك β^+ للصوديوم ^{22}Na يُصدر بوزيترون، عادة يتم إيقافه عن طريق مفعول الفناء لفوتونين غاما بطاقة قدرها (511 keV) :



كما ذكرنا سابقاً، إذا أخذنا الطيف الطاقوي للصوديوم ^{22}Na نلاحظ أن هناك ثلاثة خطوط طيفية: (511 keV) ،

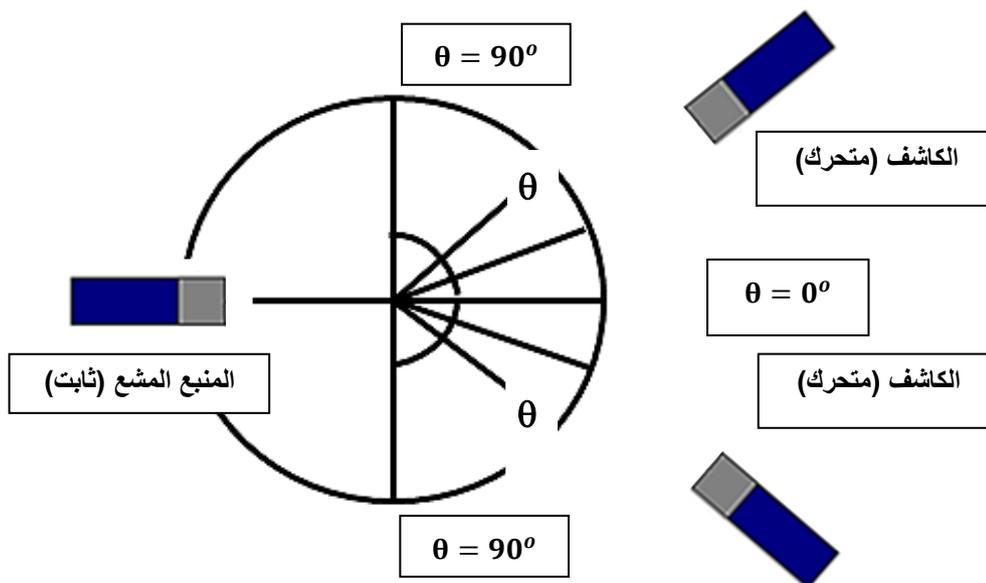
و (1274 keV) ، و $(511 \text{ keV} + 1274 \text{ keV} = 1785 \text{ keV})$ [14]. إن الخط الطيفي 511 keV ينتج عن تفكك الـ ^{22}Na إلى $^{22}\text{Ne}^{2+}$ ، بينما الخط الطيفي (1274 keV) ينتج عن تفكك الـ $^{22}\text{Ne}^{2+}$ إلى ^{22}Ne المستقر. إذ أن الخط الطيفي (1785 keV) هو مجموع الخطين الطيفيين، أي مجموع الخطوتين السابقتين بخطوة واحدة (بحادثة واحدة):



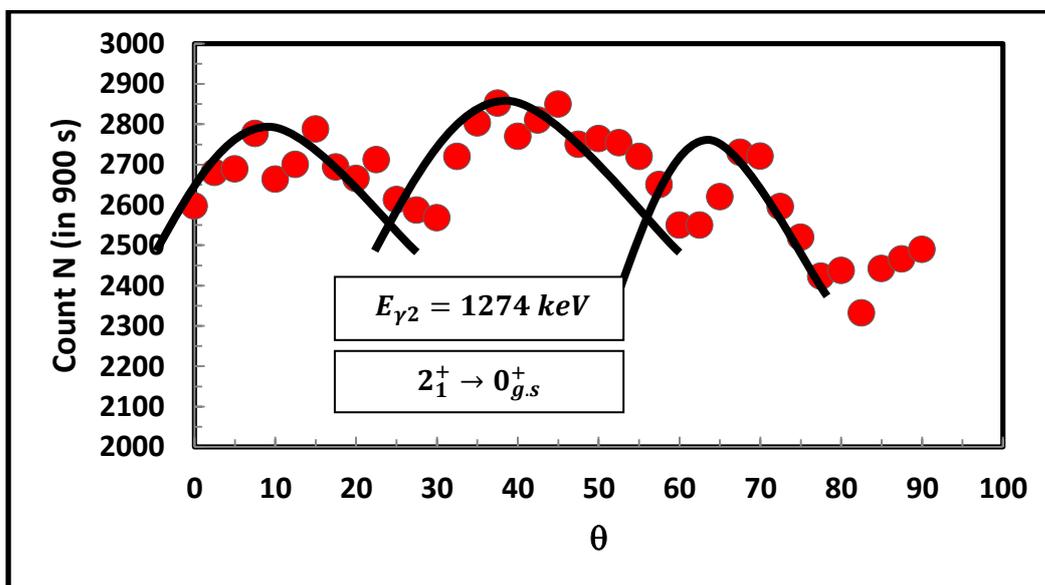
$$E_{\gamma_1} = 511 \text{ keV}, E_{\gamma_2} = 1274 \text{ keV}$$

$$E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2} = 511 + 1274 = 1785 \text{ keV}$$

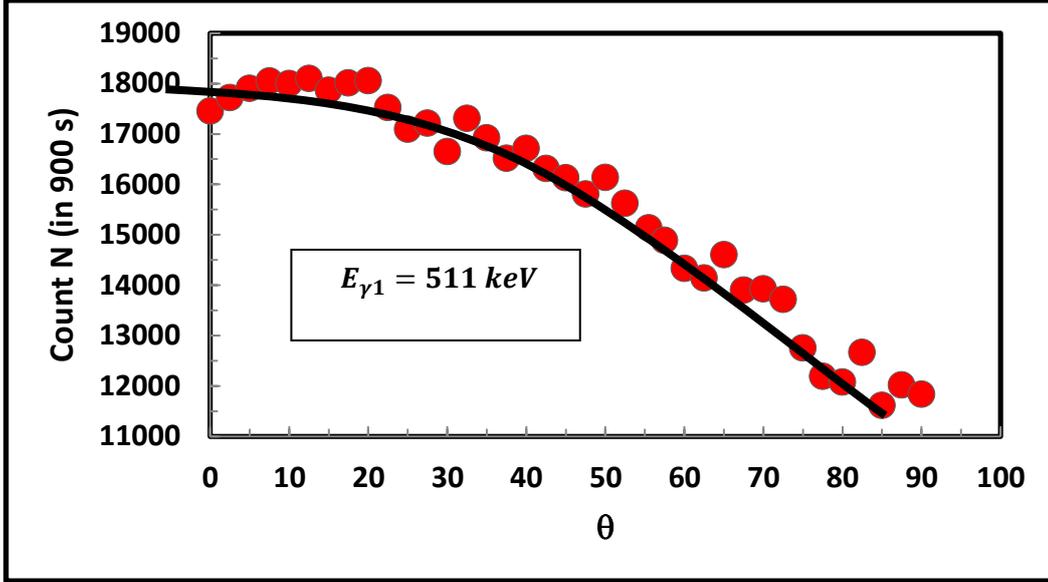
تم قياس التوزيع الزاوي للخطين الطيفيين بطاقتين (511 keV) و (1274 keV) الناتجين عن تفكك الصوديوم ^{22}Na من أجل زوايا تتراوح قيمها بين 0° و 90° ، الشكل (٨). إن الشكلين (٩) و (١٠) يُمثلان التوزيعات الزاوية للخطين الطيفيين المذكورين أعلاه.



الشكل (٨): يوضح وضع الكاشف (المتحرك) بالنسبة للمنبع المشع (الثابت). يمكن تحريك الكاشف يميناً ويساراً، أي أنه يمكننا وضع الكاشف بالزاوية التي نريدها.



الشكل (٩): يمثل تغير العد N بتابعية زاوية الكشف θ . وهذا ما نُطلق عليه اسم التوزيع الزاوي للخط الطيفي 1274 keV. وهذا يمثل الانتقال $2_1^+ \rightarrow 0_{g.s}^+$ أي من السوية المحرصة 2_1^+ إلى السوية الأساسية $0_{g.s}^+$. إن المنحنيات رُسمت فقط من أجل توجيه العين.

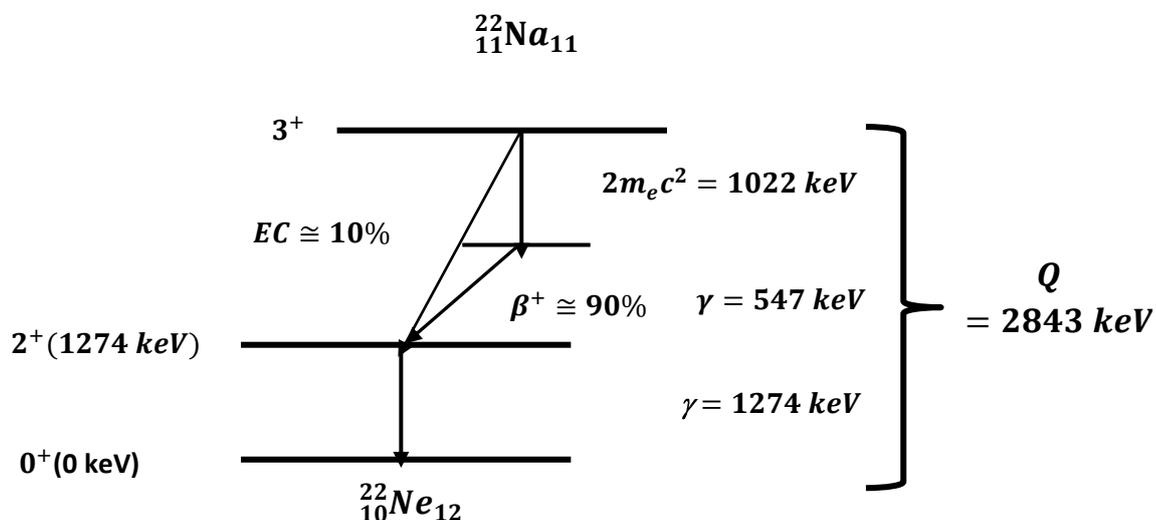


الشكل (١٠): يمثل تغير العد N بتابعية زاوية الكشف θ . وهذا ما يُطلق عليه اسم التوزيع الزاوي للخط الطيفي 511 keV. إن المنحني رُسم فقط من أجل توجيه العين.

نستنتج من التوزيعات الزاوية السابقة أن الانتقال $2_1^+ \rightarrow 0_{g.s}^+$ الذي طاقته تساوي (1274 keV) له مميزات وصفات خاصة حيث نرى ظهور أكثر من ذروة (قيمة عظمى)، وهي مختلفة عن التوزيع الطاقوي للخط الطيفي الذي طاقته تساوي (511 keV)، حيث هناك تناقص في معدل العد بتابعية تزايد زاوية الكشف، وهو من منشأ مختلف تماماً ناتج عن فناء بوزيترون مع إلكترون.

إن القيمة العظمى الأولى (أو الذروة الأولى) للانتقال $2_1^+ \rightarrow 0_{g.s}^+$ تتواجد عن الزاوية $\theta = 15^\circ$ ، بينما الذرى الأخرى تظهر عند الزوايا الأكبر من $\theta = 15^\circ$. وعادة في هذا المجال، أو في هذا النوع من الدراسات، فإنه كلما زادت قيمة السبين النووي J^π ، بعبارة أخرى، كلما ازدادت قيمة l ، فإن القيمة العظمى الأولى للتوزيع الزاوي ينزاح نحو اليسار، وهذا ما تم ملاحظته عند دراسة التوزيعات الزاوية للسويتين 2_1^+ و 4_1^+ لنواة النيكل $^{60}_{28}\text{Ni}$ الناتجة عن تفكك بيتا سالب للكوبالت $^{60}_{27}\text{Co}$ ، أي باتجاه القيم المتزايدة للزاوية [15]، وهذه النتائج تتوافق مع النتائج المتعارف عليها في هذا النوع من الدراسات.

يمثل الشكل (١١) مخطط التفكك لنظير الصوديوم $^{22}_{11}\text{Na}$ المشع.



الشكل (١١): مخطط التفكك للصوديوم $^{22}_{11}\text{Na}$ بواسطة التفكك β^+ حيث يتم توليد النيون المحرض $^{22}_{10}\text{Ne}^*$ الذي بدوره يُصدر أشعة غاما بطاقة قدرها 1274 keV .

أولاً سوف نطرح السؤال التالي: ما هي قيمة الطاقة الناتجة عن تفكك الصوديوم $^{22}_{11}\text{Na}$ إلى النيون $^{22}_{10}\text{Ne}$ ؟ وما هي الطاقة المحررة التي توزع على شكل طاقة حركية بين نواتج التفكك (النواة الوليدة $^{22}_{10}\text{Ne}$ ، البوزيترون e^+ ، والنيوترينو الإلكتروني ν_e)؟

عادة يتم حساب ميزان الطاقة، وخاصة الطاقة المتوفرة (الجاهزة)، بمساعدة الكتل النووية. إن هذا غير دقيق، أو غير فيزيائي لأن الهدف أو المنبع المشع مكون من ذرات وليس من نوى. إذاً، فمن الأفضل أن نكتب بشكل صحيح ميزان الطاقة باستخدام الكتلة الذرية التي تُعطى بالعلاقة التالية:

$$\mathcal{M}(A, Z)c^2 = M(A, Z)c^2 + Zm_e c^2 - E_b$$

حيث: \mathcal{M} الكتلة الذرية، M الكتلة النووية، m_e كتلة إلكترون، Z شحنة النواة أو عدد البروتونات في النواة، c سرعة الضوء و E_b طاقة الارتباط للإلكترون في الذرة. ومن أجل التفكك بيتا β فالطاقة المتوفرة تحمل اسم Q_β التي تُكتب على الشكل التالي [١]:

$$Q_{\beta^-} = \mathcal{M}(A, Z)c^2 - \mathcal{M}(A, Z + 1)c^2 \quad (1)$$

$$Q_{\beta^+} = \mathcal{M}(A, Z)c^2 - \mathcal{M}(A, Z - 1)c^2 - 2m_e c^2 \quad (2)$$

وذلك بإهمال الفرق في طاقة الارتباط للذرات (A, Z) و $(A, Z + 1)$ أو $(A, Z - 1)$ ، وهذا يُعتبر شرعي. في الواقع، أثناء الانتقال أو التفكك بيتا β فإن النواة البدائية تحتوي Z بروتون والنواة النهائية $Z + 1$ أو $Z - 1$ بحسب التفكك إذا كان β^- أو β^+ على التوالي. بالمقابل، فإن الـ Z إلكترون ذري لا تتأثر مباشرة بالانتقال أو بالتفكك بطريقة أن الذرة النهائية تبدو مؤقتاً أو إلى حين كشاردة موجبة أو سالبة على الترتيب. بالتأكيد، فيما بعد وبزمن

قصير جداً (من مرتبة الـ 10^{-12} ثانية)، الذرة النهائية تُرتب نفسها وتصبح حيادية بمساعدة الوسط المكون من المنبع، لكن من أجل الانتقالات أو التفككات بحد ذاتها، فإن موازين الطاقة تُكتب على النحو التالي:

$$M(A, Z)c^2 + Zm_e c^2 - E_b^{\beta^-} \rightarrow M(A, Z + 1)c^2 + Zm_e c^2 - E'_b + m_e c^2$$

$$\mathcal{M}(A, Z)c^2 \xrightarrow{\beta^-} \mathcal{M}(A, Z + 1)c^2 - m_e c^2 + m_e c^2$$

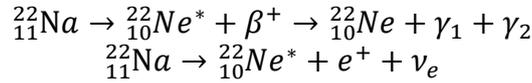
و:

$$M(A, Z)c^2 + Zm_e c^2 - E_b^{\beta^+} \rightarrow M(A, Z - 1)c^2 + Zm_e c^2 - E'_b + m_e c^2$$

$$\mathcal{M}(A, Z)c^2 \xrightarrow{\beta^+} \mathcal{M}(A, Z - 1)c^2 + m_e c^2 + m_e c^2$$

وذلك بإهمال الفرق بين طاقتي الارتباط ($E_b - E'_b$) نحصل على الطاقات المتوفرة (الجاهزة) المعطاة في العلاقتين (١) و (٢). وهذه الاعتبارات السابقة تؤخذ بشكل خاص في ظاهرة الأسر الإلكتروني [١٧، ١٨].

إن تفكك نظير الصوديوم $^{22}_{11}\text{Na}$ يتم بواسطة تفكك β^+ (أي تحول بروتون إلى نيوترون)، في معظم الأحيان (أكثر من ٩٠%)، إلى السوية المحرصة (1274 keV) للنيون $^{22}_{10}\text{Ne}^{2+}$. ويتفكك لاحقاً إلى الحالة الأساسية مُصدراً فوتون غاما طاقته (1274 keV) متبوعاً [١٤].
تُعطى معادلة التفكك لنظير الصوديوم $^{22}_{11}\text{Na}$ على النحو الآتي:



تُحسب الطاقة الناتجة عن التفكك (أو الطاقة الكلية) وفق العلاقة التالية:

$$Q = (M_{\text{Na}} - M_{\text{Ne}})c^2 = (21,994437 \text{ u} - 21,991385 \text{ u}) \left(\frac{931.5 \text{ MeV}}{\text{u}} \right) = 2,842938 \text{ MeV} \\ \cong 2,843 \text{ MeV} \cong 2843 \text{ keV}$$

حيث M ترمز للكتلة النووية. بينما تُحسب الطاقة المتوفرة (الجاهزة) Q_{β^+} الناتجة عن التفكك السابق انطلاقاً من الكتلة النووية التي تساوي إلى الفرق بين الكتلة الذرية وكتلة الإلكترونات المرافقة للنواة الذرية المُعتبرة على النحو الآتي، وذلك بافتراض أن كتلة النيوتريون الإلكتروني ν_e مهملة، وكتلة البوزيترون تساوي إلى كتلة الإلكترون m_e ($m(e^+) = m(e^-) = m_e$):

$$\begin{aligned}
 Q_{\beta^+} &= [M_{Na}({}^{22}_{11}\text{Na}) - 11m_e] - (\{M_{Ne}({}^{22}_{10}\text{Ne}) - 10m_e\} + m_e)]c^2 \\
 &= [M_{Na}({}^{22}_{11}\text{Na}) - M_{Ne}({}^{22}_{10}\text{Ne}) - 2m_e]c^2 \\
 &= (21,994437 u - 21,991385 u) \left(\frac{931,5 \text{ MeV}}{u} \right) - 2 \times 0,511 \text{ MeV} = \\
 &= 2,842938 \text{ MeV} - 1,022 \text{ MeV} \cong 1,821 \text{ MeV} \cong 1821 \text{ keV}
 \end{aligned}$$

وهذه الطاقة الجاهزة أو المتوفرة والتي تساوي (1821 keV) تتوزع على شكل طاقة حركية بين نواتج التفكك (النواة الوليدة ${}^{22}_{10}\text{Ne}$ ، البوزيترون e^+ ، والنيوترينو الإلكتروني ν_e). نلاحظ أيضاً أن:

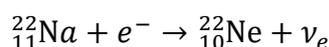
$$Q = Q_{\beta^+} + 2m_e c^2 = 1821 + 1022 = 2843 \text{ keV}$$

ونشير هنا إلى أن تفكك β^+ لا يمكن أن يحدث إلا إذا تحقق الشرط التالي:

$$M_{Na}({}^{22}_{11}\text{Na})c^2 > M_{Ne}({}^{22}_{10}\text{Ne})c^2 + 2m_e c^2$$

وهذا يقود إلى إدخال مفهوم الأسر الإلكتروني (Electronic Capture - EC) الذي يدخل بمنافسة مع تفكك β^+ . وهنا لا بد من كلمة صغيرة حول هذا المفهوم.

إن إصدار بوزيترون وأسر إلكترون هما مفعولان توأم، أي أن أسر إلكترون له نفس مفعول إصدار بوزيترون: تحويل بروتون من بروتونات نواة إلى نيوترون وإنقاص الشحنة الكهربائية بمقدار واحد، ويتم توليد نيوترينو إلكتروني في الحالة النهائية. وبحسب حالتنا من أجل الصوديوم ${}^{22}_{11}\text{Na}$ ، فيمكن كتابة الأسر الإلكتروني وفق المعادلة التالية:



والطاقة المحررة عن مفعول الأسر الإلكتروني Q_{EC} للصوديوم تساوي:

$$\begin{aligned}
 Q_{EC} &= [M_{Na}({}^{22}_{11}\text{Na}) - M_{Ne}({}^{22}_{10}\text{Ne})]c^2 \\
 &= [\{M_{Na}({}^{22}_{11}\text{Na}) - 11m_e\} - (\{M_{Ne}({}^{22}_{10}\text{Ne}) - 10m_e\}) + m_e]c^2 \\
 &= [M_{Na}({}^{22}_{11}\text{Na}) - M_{Ne}({}^{22}_{10}\text{Ne})]c^2 \\
 &= (21,994437 u - 21,991385 u) \left(\frac{931,5 \text{ MeV}}{u} \right) = 2,842938 \text{ MeV} \\
 &\cong 2,843 \text{ MeV} \cong 2843 \text{ keV}
 \end{aligned}$$

وهذه الطاقة المُحررة التي تساوي (2843 keV) توزع على شكل طاقة حركية بين نواتج التفكك (النواة الوليدة $^{22}_{10}\text{Ne}$ والنيوترينو الإلكتروني ν_e). ونشير هنا إلى أن:

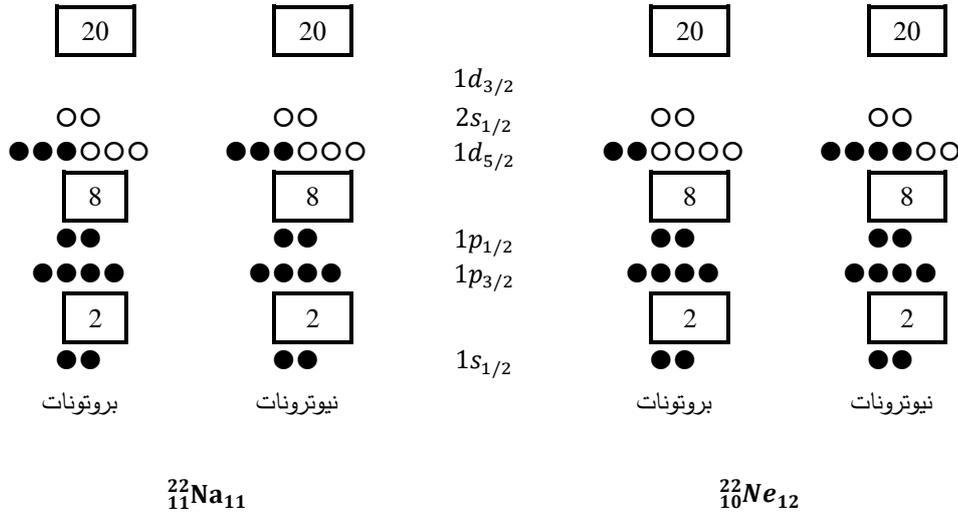
$$Q_{EC} = Q_{\beta^+} + 2m_e c^2 = 1821 + 1022 = 2843 \text{ keV}$$

وإن الطاقة الحركية العُظمى التي يمكن للنيوترون أن يحملها أو يكتسبها $T_{max}(e^+)$ تُعطى بالعلاقة التالية:

$$T_{max}(e^+) = Q - 1274 - 2m_e c^2 = 2843 - 1274 - 1022 = 547 \text{ keV}$$

ونشير أخيراً إلى أنه إذا كان $Q > 2m_e c^2$ فإن الأسر الإلكتروني هو المسيطر (المتفوق) أمام β^+ من أجل النوى الثقيلة (Z كبيرة)، وذلك لأن الإلكترونات تكون بشكل وسطي أكثر قريباً من النواة. وبعد الأسر الإلكتروني، هناك إعادة ترتيب للإلكترونات الذرية إما بإصدار أشعة X تميز الذرة الوليدة، وإما بإصدار إلكترون أوجيه Auger.

بالعودة إلى النواة $^{22}_{10}\text{Ne}_{12}$ الناتجة عن تفكك النظير المُشع للصوديوم $^{22}_{11}\text{Na}_{11}$ نلاحظ أن هذه النواة هي زوجية البروتونات والنيوترونات. واستناداً إلى نموذج الطبقات، فإن توزيع البروتونات والنيوترونات على الطبقات النووية موضح في الشكل (١٢).



الشكل (١٢): توزيع البروتونات والنيوترونات على الطبقات النووية لكل من $^{22}_{11}\text{Na}_{11}$ و $^{22}_{10}\text{Ne}_{12}$ وفق نموذج الطبقات.



استناداً إلى ذلك، وإلى توزيع البروتونات والنيوترونات على الطبقات وفق نموذج الطبقات، فإن سبين ونوعية الحالة الأساسية (المُستقرة غير المُحرضة) للنوى المدروسة هي [١٩]:

من أجل $^{22}_{10}\text{Ne}_{12}$ (زوجية - زوجية):

$(J^\pi) = 0^+$ وذلك لأنهما نوى زوجية البروتونات والنيوترونات

من أجل ${}_{11}^{22}Na$ (فردية - فردية):

$$|j_n - j_p| \leq j \leq |j_n + j_p| \rightarrow \left| \frac{5}{2} - \frac{5}{2} \right| \leq j \leq \left| \frac{5}{2} + \frac{5}{2} \right| \rightarrow j = 0, 1, 2, 3, 4, 5$$

$$\pi = (-1)^{\ell_n + \ell_p} = (-1)^{d+d} = (-1)^{2+2} = +$$

$$\rightarrow (J^\pi) = 0^+, 1^+, 2^+, 3^+, 4^+, 5^+$$

ووجد تجريبياً أن $(J^\pi) = 3^+$ وهي قيمة تقع بين القيم المتوقعة نظرياً.

٥- الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا العمل دراسة تجريبية للطيف الطاقة للنظيرين المشعّين الكوبالت ${}_{27}^{60}Co$ والصوديوم ${}_{11}^{22}Na$ وقياس التوزع الزاوي لكل من الانتقالات الناتجة عن تفكك النظيرين السابقين من أجل زوايا تتراوح قيمها بين 0° و 90° . استنتجنا من التوزعات السابقة أن كل انتقال له مميزات وصفات مختلفة عن الآخر وكانت هذه النتائج متوافقة مع النتائج المتعارف عليها في هذا النوع من الدراسات.

إن هذا العمل استند على تطبيقات نموذج الطبقات للنوى التي تمتلك عدة نيوكليونات تكافئية حول الطبقات المغلقة أو المملوءة، وخاصة الجملة بنيوكليونين، التي تلعب دوراً مهماً في التوقعات النظرية لهذا النموذج، وخاصة التأثير المتبادل بين نيوكليون ونيوكليون.

اهتمنا في هذا العمل بالنوى الغنية بالنيوترونات سحرية البروتونات وتقريباً سحرية النيوترونات مثل نظائر النيكل.

أخيراً، يمكن القول على ضوء هذا العمل وأعمال أخرى متعلقة بالتركيب النووي لمناطق أخرى من الكتل أن تأثيرات ومفاعيل الطبقات في النوى لم تتضبط ولم تنتهي، وهي تتعلق بتشكيلات الجسيمات (البروتونات والنيوترونات) التكافئية، أي التي تتواجد في الطبقات النووية الأخيرة.

المراجع

- [1] Luc Valentin, *Physique subatomique: Noyaux et Particules*. Enseignement des sciences. Hermann, Paris, 1975.
- [2] A. Maesschalck. *The changing mean field in exotic nuclei: a shell-model point of view*. Phd thesis, Universiteit Gent, Faculteit Wetenschappen 2006, 4.
- [3] M. G. Mayer. *Nuclear configurations in the spin-orbit coupling model. i. empirical evidence*. Phys. Rev. 78, 16, 1950, 4.
- [4] R. F. Casten. *Nuclear structure from a simple perspective*. Oxford University Press, 2000, 6, 15.
- [5] T. Otsuka et al, *Phys. Rev. Lett.* 105, 2010, no. 032501.
- [6] M. G. Mayer, *Phys. Rev.* 75, 1949, 1969.
- [7] O. Haxel, J. Hans, D. Jensen, and H. E. Suess, *Phys. Rev.* 75, 1949, 1766.
- [8] M. A. Preston, *Physics of the Nucleus*. Addison-Wesley publishing company, Inc., 1962.

- [9] *Atomic and Nuclear Physics*, Radioactivity, Detection of Radioactivity, Printed in the Federal Republic of Germany by Leybold Didactic GmbH, 2007, experiment p6.5.6.1, 1-4.
- [10] J. P. Davidson, *Collective Models of the Nucleus*, Academic Press, New York and London, 1986.
- [١١] J. Jabbour, H. Jbeli and S. Aljammal, *Experimental and Analytical Study of the Energy Spectrum and Decay Schemes of both Isotopes Cobalt ^{60}Co and Sodium ^{22}Na* . Tishreen University Journal, Vol (41), No (1) 2019.
- [١٢] J. Jabbour, J. Mulhem and S. Yassin, *Experimental Study of the Conservation Law in Compton Effect*. Accepted for publication in Tishreen University Journal, 2012.
- [١٣] J. Jabbour, H. Jbeli and J. Mulhem, *Measuring the radioactivity resulted from (^{137}Cs) and from (^{40}K) isotopes of milk samples from different sources in the city of Lattakia*. Accepted for publication in Tishreen University Journal, 2013.
- [١٤] J. Jabbour, H. Jbeli and S. Aljammal, *Analytical and experimental study of the mechanisms of account and measure the radioactivity of the radioactive sources*. Accepted for publication in Tishreen University Journal, 2014.
- [15] Daphne F. Jackson, *Nuclear Reactions*, Mathuen & Co LTD, U.S.A., 1970.
- [16] ORTEC Application Note. An 34, *Experiments in Nuclear Sciences*, 2013, Published by ORTEC, Experiment 3, Gamma-Ray Spectroscopy Using NaI(Tl) , 1-20. www.ortec-online.com.
- [17] M. A. Preston, *Physics of the Nucleus*. Addison-Wesley publishing company, Inc., 1962.
- [18] Walter E. Meyerhof, *Element de physique nuclaire*, Dunod Universite, Paris, 1970.
- [19] Aurore Dijon. *Evolution de la collectivité autour du ^{68}Ni : rôle des états intrus*. Physique Nucléaire expérimentale [nucl-ex]. Université de Caen, France, 2012. 118.